

DOI: 10.17516/1999-494X-0243

УДК 678.073

Research of Tribotechnical Properties of Composites Based on UHMWPE, Including Friction in the Environment of Various Lubricants

Olga V. Gogoleva*,
Pavlina N. Petrova and Elena S. Kolesova
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS
FRC “Yakut Science Center”
Yakutsk, Russian Federation

Received 28.02.2020, received in revised form 21.05.2020, accepted 15.07.2020

Abstract. Dependences of the wear resistance of ultra-high molecular weight polyethylene and composites based on it with carbon fibers on contact pressure have been obtained, which make it possible to determine their load capacity in the regime of dry and boundary friction in the environment of various lubricating oils at a sliding speed of a steel counterbody of 0.5 m/s. It has been established that the life of UHMWPE and composites based on it during dry friction with increasing contact pressure is determined mainly not by the wear of the working surface, but by the plastic deformation of the surface layers of the composites due to an increase in temperature in the frictional contact zone. It has been found that the use of gear oil as a lubricant during friction of PCM contributes to the formation of a more durable boundary layer which protects the material from wear.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene, polymer composite material, carbon fiber, mass wear rate, friction track area, lubricant, oil.

Citation: Gogoleva O.V., Petrova P.N., Kolesova E.S. Research of tribotechnical properties of composites based on UHMWPE, including friction in the environment of various lubricants, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2020, 13(5), 517-524. DOI: 10.17516/1999-494X-0243

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: oli-gogoleva@yandex.ru

Исследование триботехнических свойств композитов на основе СВМПЭ, в том числе при трении в среде различных смазочных масел

О.В. Гоголева, П.Н. Петрова, Е.С. Колесова
*Институт проблем нефти и газа СО РАН
ФИЦ «Якутский научный центр»
Российская Федерация, Якутск*

Аннотация. Получены зависимости износостойкости сверхвысокомолекулярного полиэтилена и композитов на его основе с углеродными волокнами от контактного давления, позволяющие определить их нагрузочную способность в режиме сухого и граничного трения в среде различных смазочных масел при скорости скольжения стального контртела 0,5 м/с. Установлено, что ресурс СВМПЭ и композитов на его основе в процессе сухого трения при повышении контактного давления определяется в основном не изнашиванием рабочей поверхности, а пластической деформацией поверхностных слоев композитов вследствие повышения температуры в зоне фрикционного контакта. Установлено, что использование трансмиссионного масла в качестве смазочной среды при трении ПКМ способствует формированию более прочного граничного слоя, предохраняющего материал от изнашивания.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полимерный композиционный материал, углеродное волокно, скорость массового изнашивания, площадь дорожки трения, смазочная среда, масло.

Цитирование: Гоголева, О.В. Исследование триботехнических свойств композитов на основе СВМПЭ, в том числе при трении в среде различных смазочных масел / О.В. Гоголева, П.Н. Петрова, Е.С. Колесова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(5). С. 517-524. DOI: 10.17516/1999-494X-0243

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) обладает уникальными характеристиками, такими как высокая прочность, относительно низкий коэффициент трения, стойкость к растрескиванию, высокие морозо-, агрессивно- и износостойкость, необходимые для обеспечения работоспособности узлов трения в широком спектре условий эксплуатации. Области применения деталей из разработанных материалов на основе СВМПЭ непрерывно расширяются. Это карьерная техника, трубопроводы и автомобильный транспорт, а также детали военной техники. Внедрение новых материалов, разработанных для производства этих изделий, значительно увеличит ресурс работы, будет иметь экономический эффект от сокращения времени простоя техники и гарантировать устойчивое развитие добывающей и перерабатывающей промышленности Арктики [1-4]. Однако СВМПЭ имеет ряд характеристик, ограничивающих его широкое использование. Например, при температуре 90-95 °С материал начинает размягчаться, при высоких давлениях сжатия происходит деформация изделий [5-7].

В связи с этим исследование триботехнических свойств СВМПЭ и композитов на его основе, позволяющих определить их нагрузочную способность, является актуальной задачей полимерного материаловедения.

Известно, что целый ряд агрегатов и механизмов в силу своего назначения работают в среде жидких смазочных масел, а полимерные детали широко используются в узлах трения в самых разных конструкциях трибосистем, смазываемых как минеральными, так и синтетиче-

скими маслами. В связи с этим исследованы триботехнические характеристики полимерных материалов в условиях повышения контактной нагрузки при трении (скорость скольжения вала постоянная) в режиме сухого трения и в среде различных жидких смазочных материалов.

Объекты и методики испытаний

Проведены триботехнические исследования полимерных композитов на основе СВМПЭ (Gur-4150), наполненные углеродным волокном «Белум» (ОАО «СветлогорскХимволокно» (Беларусь). Триботехнические характеристики (коэффициент трения, скорость массового изнашивания) определяли на машине трения ИИ-5018. Стандартные условия трения для композитов на основе СВМПЭ следующие: нагрузка 200 Н, скорость скольжения 0,5 м/с. В данной работе были проведены триботехнические испытания СВМПЭ и композитов на его основе при постоянной скорости скольжения вала 0,5 м/с, при этом нагрузку увеличивали с 200 до 450 Н с шагом 50 Н. Время испытания 3 ч. Схема трения диск-диск (рис. 1а), испытание материалов в смазочной среде заключается в том, что контртело опускалось в ванну (рис. 1б) со смазочным материалом. Использование ванны со смазочным материалом обеспечивает возможность подпитки граничного слоя из объема смазочного материала, таким образом граничная смазка продолжает осуществляться в течение всего времени испытаний. Для достоверности сравнения в среде смазочных масел за критерий износа образцов принимали площадь дорожки трения (табл. 1). Площадь дорожки трения вычисляли по программе ImageJ 1.46r.

В качестве жидких смазочных сред при трении полимерных композиционных материалов использовали промышленное масло марки И-20А, трансмиссионное масло марки Siboil TAD-17и и гидравлическое масло марки Роснефть Gidrotec HLP 46.

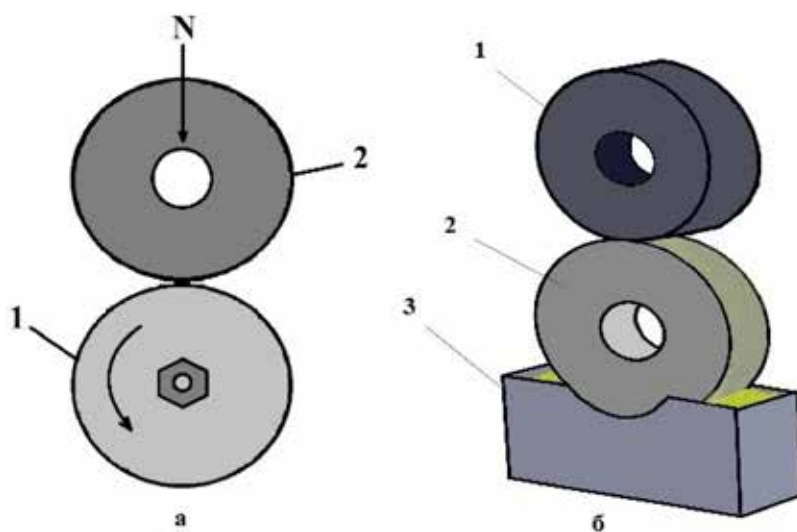


Рис. 1. Схема трения «Диск-диск»: а – сухое трение; б – в режиме граничной смазки: 1 – образец для испытания; 2 – стальное контртело; 3 – ванна со смазочным материалом





Fig. 1. Disc-disk friction diagram: а – dry friction; б – in the boundary lubrication mode: 1 – test sample; 2 – steel counterbody; 3 – bath with lubricant

Обсуждение результатов

Установлено, что ненаполненный СВМПЭ выдерживает максимальную нагрузку 300 Н при скорости скольжения вала 0,5 м/с. При таких режимах трения выявлено, что образец не теряет форму (табл. 1).

Таблица 1. Зависимость триботехнических показателей СВМПЭ от нагрузки испытания

Table 1. The dependence of the tribotechnical parameters of UHMWPE from the test load

Показатели\нагрузка при трении	200 Н	250 Н	300 Н	350 Н
Скорость массового изнашивания, мг/ч	0,53	0,73	5,26	8,06
Площадь дорожки трения, мм ²	30,3	33,9	104,9	115,9
Температура в зоне контакта, °С	45-50	60-75	75-90	90-105
Внешний вид изношенных образцов со следами трения				

При повышении нагрузки до 350 Н образец СВМПЭ по истечении первого часа испытаний начинает деформироваться и зарегистрировано оплавление поверхности (табл. 1). Наблюдается формирование на поверхности трения наплывов, имеющих волнообразную форму. Таким образом, рекомендуемый режим трения для исходного СВМПЭ марки ГУР 4150 при скорости скольжения вала 0,5 м/с составляет 300 Н.







Установлено, что по сравнению с результатами трения, полученными при стандартной нагрузке испытания, равной 200 Н, скорость массового изнашивания СВМПЭ увеличилась в 10 и 15 раз соответственно при нагрузках 300 и 350 Н. При этом площадь дорожки трения увеличилась в 3,5-3,8 раза, температура в зоне контакта повышается до 2 раз.

Триботехнические испытания в зависимости от контактной нагрузки проводили на образцах композита на основе СВМПЭ, содержащего 5 мас. % углеродного волокна марки «Белум». Из данных табл. 2 видно, что скорость массового изнашивания композита увеличивается с увеличением прилагаемой нагрузки до 450 Н. Испытания закончили при 450 Н, так как при этом зарегистрировано повышение температуры в зоне контакта до 105 °С и некоторое уширение образца в перпендикулярном направлении трения, свидетельствующее о начале пластической деформации.

Таким образом, наполненный УВ СВМПЭ выдерживает нагрузку до 450 Н при скорости скольжения вала 0,5 м/с, что на 150 Н больше, чем выдерживает исходный СВМПЭ. Это объясняется механическим торможением пластического деформирования полимерной матрицы за счет высокомодульного жесткого волокна, приводящим к повышению прочности при сжатии на 20 % и снижению ползучести ПКМ в 2 раза по сравнению с исходным СВМПЭ [8]. Зарегистрировано снижение температуры в зоне контакта при трении ПКМ по сравнению с исходным СВМПЭ, что связано с повышением теплопроводности за счет УВ.

Таблица 2. Зависимость триботехнических характеристик ПКМ от приложенной нагрузки

Table 2. Dependence of tribological characteristics of PCM on applied load

Параметры \ Нагрузка	200	250 Н	300 Н	350 Н	400 Н	450 Н
Скорость массового изнашивания, мг/ч	0,16	0,23	0,43	0,5	1,2	1,02
Площадь дорожки трения, мм ²	30,6	31,2	40,0	49,9	70,6	75,1
Температура в зоне контакта, °С	45-50	45-50	50-60	70-80	70-90	95-105
Шероховатость поверхности трения, мкм	-	1,14	3,16	3,38	4,23	-
Внешний вид изношенных образцов со следами трения						

Снижение скорости массового изнашивания ПКМ при увеличении нагрузки с 400 до 450 Н, вероятно, объясняется тем, что при повышении нагрузки увеличивается температура в зоне контакта до 105 °С, соответствующих размягчению полимера, вследствие этого продукты износа, не успевая выйти из зоны трения, закрепляются (наплавляются) обратно на поверхность трения.

Известно, что, когда образец и контртело сопрягаются по выступам неровностей поверхности, площадь их фактического контакта в начальный период трения мала [9, 10]. Далее при нагружении пары трения действуют большие давления, результатом чего является значительная пластическая деформация. Неровности поверхности частично сминаются и разрушаются как по выступам, так и по впадинам. Как видно из профилограмм поверхностей ПКМ до и после трения происходит сглаживание микронеровностей поверхности в процессе трения с установлением равновесной шероховатости (рис. 2а и б).

Сглаживание микронеровностей и волнистости поверхностей (приработка) сопровождается увеличением несущей поверхности, снижением интенсивности изнашивания и установлением постоянного коэффициента трения.

Далее проведены испытания композита при нагрузках 400 Н в различных смазочных средах (табл. 3). Были также выбраны промышленное масло марки И-20А, трансмиссионное масло марки Siboil TAD-17и, гидравлическое масло марки Роснефть Hidrotec HLP 46.

При трении СВМПЭ и ПКМ в различных маслах зарегистрировано существенное снижение температуры в зоне контакта металлополимерной трибосистемы в 2,5-3,5 раза по сравнению с трением без смазки. Снижение температуры в зоне фрикционного контакта способствует повышению допустимой нагрузки, так как основным ограничивающим фактором использования СВМПЭ и композитов на его основе в узлах трения несмотря на их уникальную износостойкость и прочность является контактная температура вследствие относительно низкой теплостойкости СВМПЭ.

Наименьшая площадь дорожки трения СВМПЭ и ПКМ наблюдается при трении в среде трансмиссионного масла Siboil TAD. Во-первых, это связано с наличием в данной марке

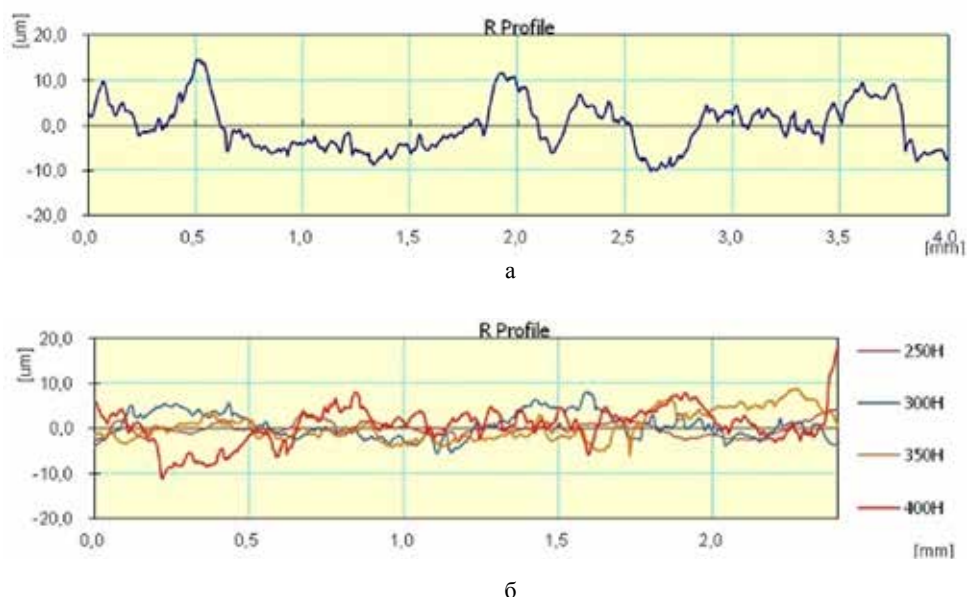


Рис. 2. Профилграммы поверхности ПКМ до (а) и после трения (б) при разных нагрузках в режиме сухого трения

Fig. 2. Profilograms of the PCM surface before (a) and after friction (б) at different loads in the dry friction mode

Таблица 3. Характеристики СВМПЭ и композитов при трении при 400 Н в зависимости от смазочной среды

Table 3. Characteristics of UHMWPE and composites during friction at 400 N depending on the lubricating medium

	СВМПЭ			СВМПЭ + 5 мас. % Белум		
	Siboil TAD-17u	Gidrotec HLP 46	И-20А	Siboil TAD-17u	Gidrotec HLP 46	И-20А
Площадь дорожки трения, мм ²	23,9	33,3	36,1	25,8	31,5	32,1
Температура в зоне контакта, °С	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40
Шероховатость поверхности трения, мкм	-	-	-	2,75	2,36	1,11

масла специальных антифрикционных присадок, обеспечивающих формирование более прочного граничного слоя, предохраняющего материал от изнашивания; во-вторых, уменьшение дорожки трения свидетельствует о снижении фактического контакта рабочей поверхности полимерного материала со смазочным материалом. Это способствует снижению интенсивности деструктивного процесса поверхностного слоя при контакте со смазочным материалом, снижающим жесткость и увеличивающим деформацию рабочей поверхности полимерного материала.

Шероховатость ПКМ в среде смазочных масел уменьшается в 1,5-3,8 раза по сравнению с трением композитов в режиме сухого трения, что можно объяснить формированием на поверхности трения антифрикционного слоя, образующегося вследствие заполнения микронеровностей поверхностей ПКМ частицами компонентов смазки (рис. 3, табл. 3).

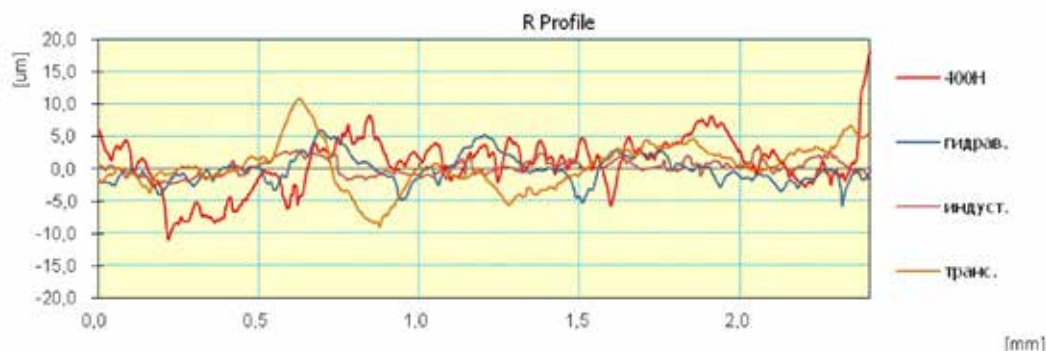


Рис. 3. Профилограммы поверхности ПКМ после трения под нагрузкой 400 Н в режиме сухого и граничного трения в различных смазочных маслах

Fig. 3. Profilograms of the PCM surface after friction under a load of 400 N in the regime of dry and boundary friction in various lubricating oils

Заключение

Таким образом, после проведенных исследований установлено, что при трении СВМПЭ и композитов на его основе наибольшее влияние на их работоспособность и ресурс в режиме сухого трения в исследованном диапазоне нагрузок оказывает температура в зоне контакта из-за низкой теплостойкости СВМПЭ. Модификация СВМПЭ углеродными волокнами хоть и приводит к повышению нагрузочной способности композита, однако диапазон расширения нагрузки невелик. При увеличении нагрузки до 300-450 Н вследствие разогрева материала в зоне фрикционного контакта до температуры размягчения и выше СВМПЭ и композиты на его основе в режиме сухого трения испытывают не только упругие высокоэластические, но и необратимые деформации в поверхностном слое, что вызывает формирование зазоров в трибо-сопряжении. Исследования по влиянию жидких смазочных материалов на триботехнические свойства полимерных материалов на основе СВМПЭ показали, что все рассмотренные масла одинаково эффективно отводят тепло из зоны трения, наименьшая площадь дорожки трения наблюдается при трении в среде трансмиссионного масла Siboil TAD.

Благодарности / Acknowledgements

Работа подготовлена в рамках выполнения Госзадания АААА-А17-117040710038-8.

The work was prepared as part of the implementation of the State task АААА-А17-117040710038-8.

Список литературы / References

- [1] Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, S, 344-348 [Raskutin A.E. Strategy for the development of polymer composite materials. *Aviation Materials and Technologies*, 2017, S, 344-348 (in Russian)]
- [2] Селютин Е.Г., Гаврилов Ю.Ю., Воскресенская Е.Н. и др. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования. *Химия в интересах устойчивого развития*, 2010, 18, 375-388 [Selyutin E.G., Gavrilov Yu.Yu., Voskresenskaya E.N. et al. Composite materials based on ultra-high molecular weight polyethylene: properties, prospects for use. *Chemistry for Sustainable Development*, 2010, 18, 375-388 (in Russian)]

[3] Аммосова О.А., Аргунова А.Г., Ботвин Г.В. и др. *Модифицированные полимерные и композиционные материалы для северных условий*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 217 с. [Ammosova O.A., Argunova A.G., Botvin G.V. et al. *Modified polymeric and composite materials for northern conditions*. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2017, 217 p. (in Russian)]

[4] Бузник В.М., Каблов Е.Н. Состояние и перспективы арктического материаловедения. *Вестник Российской академии наук*, 2017, 87 (9), 827-839 [Buznik V.M., Kablov E.N. The state and prospects of Arctic material science. *Vestnik of the Russian Academy of Sciences*, 2017, 87 (9), 827-839 (in Russian)]

[5] Андреева И.Н., Веселовская Е.В., Наливайко Е.И. и др. *Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности*. Л.: Химия, 1982. 80 с. [Andreeva I.N., Veselovskaya E.V., Nalivajko E.I. et al. *Ultra high molecular weight high density polyethylene*. L.: Himiya, 1982, 80 p. (in Russian)]

[6] Люкшин Б.А., Шилько С.В., Панин С.В. и др. *Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 311 с. [Lyukshin B.A., Shil'ko S.V., Panin S.V. et al. *Dispersion-filled polymer composites for technical and medical purposes*. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2017, 311 p. (in Russian)]

[7] Михайлин Ю.А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Часть 1. *Полимерные материалы*, 2003, 3, 16-19 [Mikhaylin Yu.A. Ultra high molecular weight polyethylene. Part 1. *Polymer materials*, 2003, 3, 16-19 (in Russian)]

[8] Gogoleva O.V., Petrova P.N., Kolesova E.S. Development of Polymer Composite Materials Based on Ultrahigh-Molecular Weight Polyethylene and Carbon Fillers. *Materials Science Forum*, 2019, 945, 362-368.

[9] Белый В.А., Свиреденок А.И., Петраковец Н.И. и др. *Трение и износ материалов на основе полимеров*. Минск: Наука и техника, 1976. 431 с. [Belyj V.A., Sviredenok A.I., Petrakovec N.I. et al. *Friction and wear of materials based on polymers*. Minsk: Nauka i tekhnika, 1976, 431 p. (in Russian)]

[10] Богданович П.Н., Прушак В.Я. *Трение и износ в машинах*, Минск: Высш. шк., 1999. 374 с. [Bogdanovich P.N., Prushak V.YA. *Friction and wear in cars*, Minsk: Vyssh. shk., 1999, 374 p. (in Russian)]